

# 基于机械剥离制备的 PEDOT:PSS/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微米片异质结紫外光电探测器研究\*

宜子琪<sup>1)</sup> 王彦明<sup>1)</sup> 王硕<sup>1)</sup> 隋雪<sup>1)</sup> 石佳辉<sup>1)</sup> 杨壹涵<sup>1)</sup>  
王德煜<sup>2)</sup> 冯秋菊<sup>1)†</sup> 孙景昌<sup>1)</sup> 梁红伟<sup>2)</sup>

1) (辽宁师范大学物理与电子技术学院, 大连 116029)

2) (大连理工大学集成电路学院, 大连 116024)

(2024 年 5 月 7 日收到; 2024 年 6 月 3 日收到修改稿)

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有超宽带隙 (约 4.9 eV)、高的击穿电场 (约 8 MV/cm)、良好的化学稳定性和热稳定性等优点, 是一种很有前途的制备紫外光电探测器的候选材料. 由于未掺杂的  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 n 型导电, 所以制备 p 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 面临很多困难, 从而制约了同质 PN 结的开发与应用. 聚 (3, 4-乙烯二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸 (PEDOT:PSS) 是一种 p 型导电聚合物, 在 250—700 nm 有着较高的透明度, 采用 p 型有机材料 PEDOT:PSS 和 n 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 构成的异质结可能为 PN 结型光电器件的研制提供一种途径. 本文利用机械剥离法从  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 单晶衬底上剥离出单根  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微米片, 微米片的长度为 4 mm, 宽度为 500  $\mu$ m, 厚度为 57  $\mu$ m. 将有机材料 PEDOT:PSS 涂覆在剥离出来的微米片的一侧制备出 PEDOT:PSS/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 无机-有机异质结的紫外光电探测器, 器件表现出典型的整流特性, 而且发现器件对 254 nm 紫外光敏感, 具有良好的自供电性能. 该异质结紫外探测器的响应度和外量子效率分别为 7.13 A/W 和 3484%, 上升时间和下降时间分别为 0.25 s 和 0.20 s. 此外, 3 个月后器件对 254 nm 紫外光的探测性能并未发现明显的衰减现象. 本文的相关研究工作将对研发新型紫外探测器提供了新的思路和理论基础.

关键词:  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PEDOT:PSS, 异质结, 紫外光电探测器

PACS: 71.20.Nr, 81.05.Fb, 85.60.Gz, 85.30.-z

DOI: 10.7498/aps.73.20240630

## 1 引言

近年来, 紫外探测在导弹跟踪、无人机自动着舰导引、海上搜救、火灾预警、环境污染监测等军事和民用领域都有着广泛的应用前景. 目前, 紫外光电探测器主要是基于宽带隙半导体材料制备而成, 如 Zn<sub>x</sub>Mg<sub>1-x</sub>O, Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N,  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等<sup>[1-4]</sup>, 其中 Zn<sub>x</sub>Mg<sub>1-x</sub>O 具有高光电导特性, 但由于高 Mg 组分

的 ZnMgO 合金薄膜中存在结构分相和结晶质量等问题, 而且其制作的紫外探测器光响应截止边都大于 300 nm<sup>[5,6]</sup>. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 带隙在 3.4—6.2 eV 间可调, 但 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 的缺陷密度偏高, 这会导致器件的耐压程度和寿命均较低, 从而限制了 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 基日盲紫外探测器的探测性能<sup>[7,8]</sup>. 而  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是带隙为 4.9 eV 的 n 型 III-VI 族宽带隙氧化物半导体材料, 它在紫外波段 253 nm 处具有陡峭的吸收边, 恰好处于“日盲区”的 200—280 nm 波段内, 故

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12075045)、大连市科技创新基金 (批准号: 2023JJ12GX016, 2023JJ12GX013, 2022JJ12GX023)、辽宁师范大学 2022 年高端科研成果培育资助计划 (批准号: 22GDL002) 和辽宁师范大学教育教学改革研究项目 (批准号: LSJGJXFF202330) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjfeng@dlut.edu.cn

其成为制造紫外光电探测器的理想材料之一<sup>[9-11]</sup>. 此外,  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  还具有低毒性、高电子迁移率、在可见光和近红外光谱区域具有高透明度、低成本以及易于通过多种生长方法制备等显著特点, 也是制作电致发光器件、光电器件窗口材料、气体传感器、太阳能电池等的优异材料. 由于存在本征缺陷未掺杂的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  呈现 n 型导电, 所以 p 型  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  半导体的制备和合成仍面对很多困难, 因此限制了  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  器件的开发与应用, 也制约了其在光电领域的发展. 聚(3, 4-乙烯二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸 (PEDOT:PSS) 是一种 p 型导电的有机高分子材料, 在 250—700 nm 范围内有着较高的透明度, 且同时具有电导率高 ( $>1000$  S/cm)、空穴迁移率高 ( $1.7$  cm<sup>2</sup>/(V·s))、化学稳定性好等特性, 故可作为透明导电电极以及优秀的空穴传输层<sup>[12-14]</sup>. 所以采用 p 型有机材料 PEDOT:PSS 和 n 型  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  制成异质结型器件可为 PN 结型紫外光电探测器的研制提供一种可能途径. 此外, 单斜晶型  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  具有较大的晶体各向异性, 其 (010) 面之间的化学键呈三维网状结构, 面之间容易抵抗不同方向的外力, 不容易造成晶面的开裂, 然而 (100) 面之间及 (001) 面之间结合力较弱, 容易解理<sup>[15,16]</sup>, 所以  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  单晶可以通过机械剥离法进行剥离, 被剥离下来的单晶薄片还可以获得非常平坦的表面, 这种方法既规避了传统晶体研磨和抛光过程中晶体开裂等问题, 同时操作简单又易于实现. 本文利

用机械剥离出的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  单晶微米片制备出了单根 PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  有机-无机异质 PN 结型紫外探测器, 并对器件的紫外探测性能进行了研究.

## 2 实验过程

首先将 n 型  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  单晶衬底 (载流子浓度为  $10^{17}$  cm<sup>-3</sup>) 放置在胶带上反复粘贴多次, 剥离出所需厚度和尺寸的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  单晶微米片, 剥离出的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  微米片的长度约为 4.0 mm, 然后将微米片经过丙酮、酒精、去离子水清洗干净后备用. 将微米片的一半涂上 PEDOT:PSS 有机溶液形成 PN 结, 并将其送入鼓风干燥箱进行烘干, 拿出后在微米片的两端分别滴加 Ag 胶作为电极. 图 1 为器件的制作流程示意图. 待器件制作完毕后用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 封装以进行紫外探测性能的测试.

本文通过扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi TM3030) 对微米片的表面形貌进行表征. 为了探究器件的光响应特性, 分别在黑暗和 254 nm 紫外光照射下, 采用吉时利 Keithley 4200-SCS 半导体分析测试仪来测试器件的紫外探测性能.

## 3 结果与讨论

图 2(a) 为从  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  单晶上剥离下来单根微米片的 SEM 图. 从图 2(a) 可以看出, 剥离出来的

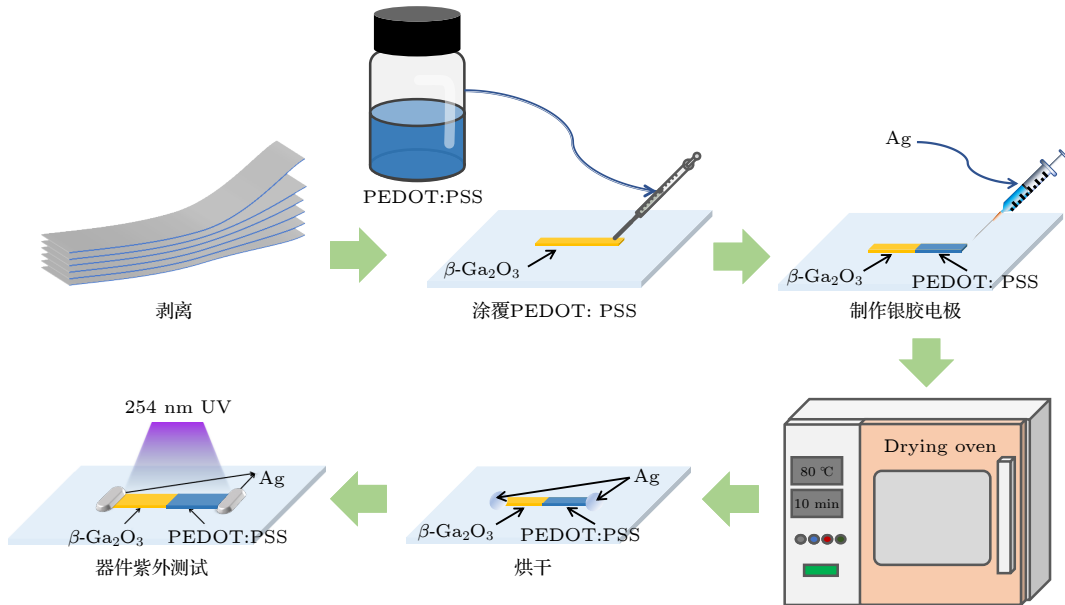


图 1 PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  紫外光电探测器的制作流程示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the preparation processes of the PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -based UV photodetector.

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  微米片表面非常平整, 边缘相对整齐, 没有缺口, 呈现较规则的矩形, 薄片的宽度约为  $500\ \mu\text{m}$ , 厚度为  $57\ \mu\text{m}$ . 图 2(b) 为在单根微米片的一侧涂覆有机层 PEDOT:PSS 后的异质结 SEM 照片, 图中可见异质结的边界非常清晰, 且有机层涂覆比较均匀, 无中断现象, PEDOT:PSS 有机层的厚度约为  $1.1\ \mu\text{m}$ .

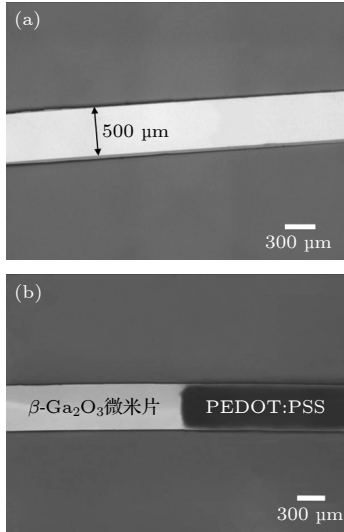


图 2 (a) 单根  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  微米片的 SEM 图; (b) 单根 PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  异质结的 SEM 图

Fig. 2. The SEM images for (a) the single  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  microsheet and (b) single PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  heterojunction.

图 3(a) 是器件分别在黑暗环境和  $254\ \text{nm}$  紫外灯照射条件下, 光功率密度为  $221\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时, 器件的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 特性曲线图, 插图为器件在黑暗条件下的  $I$ - $V$  特性曲线. 由图 3(a) 可见, 在黑暗环境和  $254\ \text{nm}$  紫外光照条件下, 该异质结器件都有着良好的整流特性, 为了证明整流特性来自于  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  和 PEDOT:PSS 形成的异质结, 将分别在  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  微米片和有机层 PEDOT:PSS 的两端滴定银胶并在黑暗条件下对其进行  $I$ - $V$  曲线测量, 结果如图 3(b), (c) 所示. 由图 3(b), (c) 可知, 银电极与 PEDOT:PSS 以及银电极与剥离的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  微米片之间均呈现线性关系, 表明银电极与 PEDOT:PSS 和  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  微米片之间均为良好的欧姆接触. 这说明图 3(a) 中器件的整流特性是来自于  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  和 PEDOT:PSS 之间形成的异质结, 表明制作的 PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  日盲紫外探测器为 PN 结型器件. 此外, 通过图 3(a) 还发现在  $254\ \text{nm}$  紫外光照时, 器件的光电流较无光照时其

电流明显增大, 这是由于在紫外光照下, 异质结空间电荷区内生成大量的光生电子-空穴对, 在内建电场作用下分离, 进而实现了由光信号到电信号之间的转化, 也表明该异质结器件对日盲紫外光敏感.

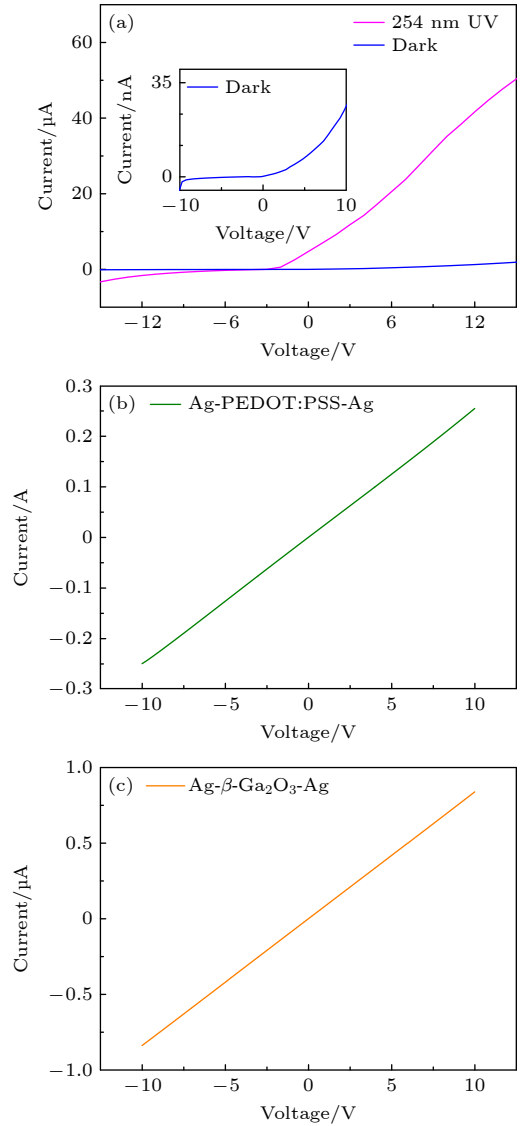


图 3 (a) 器件在黑暗和  $254\ \text{nm}$  光照下的  $I$ - $V$  曲线, 插图为黑暗条件下器件的  $I$ - $V$  曲线; (b) Ag-PEDOT:PSS-Ag 的  $I$ - $V$  曲线; (c) Ag- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -Ag 的  $I$ - $V$  曲线

Fig. 3. (a)  $I$ - $V$  curves of devices under dark and  $254\ \text{nm}$  light illumination, inset shows the  $I$ - $V$  curve of the device in dark; (b)  $I$ - $V$  curve of Ag-PEDOT:PSS-Ag; (c)  $I$ - $V$  curve of Ag- $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -Ag.

图 4 为  $0\ \text{V}$  偏压下器件在不同光功率密度下的响应时间  $I$ - $t$  曲线. 从图 4 可以看出, PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  异质结紫外光电探测器可以在没有外部电源的情况下工作, 具备自供电特性, 且展示出良好的重复性和稳定性. 另外, 还可看出器件光电流

值随着入射光功率密度的增加而增大,这是由于随着紫外光功率密度的增大,在空间电荷区被激发出的光生载流子数量增多,从而引起器件光电流值的增大<sup>[17]</sup>.当光功率密度增加到  $221 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  时,器件 A 的光电流为  $4.8 \mu\text{A}$ ,暗电流为  $2.97 \text{nA}$ ,器件光暗电流比 ( $I_{\text{Photo}}/I_{\text{Dark}}$ ) 可达  $1.62 \times 10^3$ .

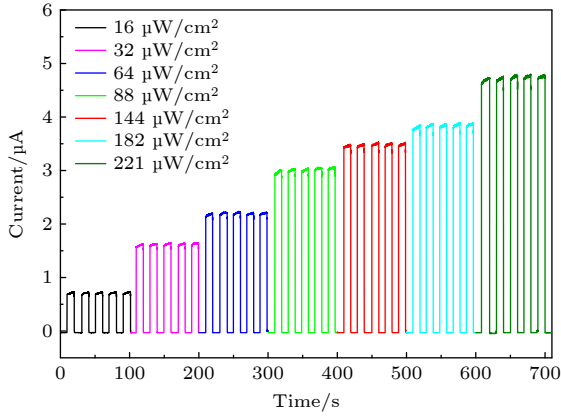


图 4 零偏压下,器件在不同光功率密度下的响应  $I-t$  曲线  
Fig. 4.  $I-t$  curves of the device under various light intensity at 0 V bias.

光电探测器的响应时间一般是指器件光电流达到饱和值的 10%—90% 所需时间为上升时间,而将光电流饱和值的 90% 下降到 10% 处所需的时间定义为下降时间.为了研究器件的响应时间,从  $221 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光功率密度下的多个稳定的响应-恢复时间曲线中,选取一个周期的响应曲线,利用单 e 指数弛豫方程对其进行拟合,结果如图 5 所示.单 e 指数弛豫方程如下所示<sup>[18,19]</sup>:

$$I(t) = I_0 + Ae^{-t/\tau}, \quad (1)$$

其中  $I_0$  是稳态光电流;  $A$  为常数;  $t$  为时间;  $\tau$  是弛

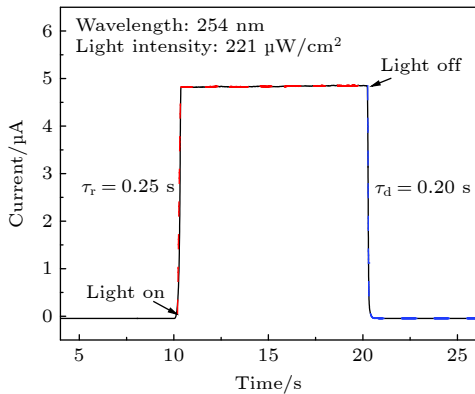


图 5 单个周期的响应-恢复时间曲线

Fig. 5. Response-recovery time curve of device for a single cycle.

豫时间常数,通常用  $\tau_r$  和  $\tau_d$  分别表示器件的上升时间和下降时间常数.根据拟合曲线,可以得出  $\tau_r$  和  $\tau_d$  分别为 0.25 s 和 0.20 s,表明该异质结器件实现了在零偏压下的快速响应.

为了评估有机/无机异质结器件对紫外光信号的检测能力,对器件的响应度 ( $R$ ) 和外量子效率 (EQE) 进行了计算,其计算公式如下<sup>[20,21]</sup>:

$$R = \frac{I_{\text{Photo}} - I_{\text{Dark}}}{P_{\lambda} S}, \quad (2)$$

$$\text{EQE} = \frac{hcR}{q\lambda}, \quad (3)$$

其中  $S$ ,  $q$ ,  $h$ ,  $c$  和  $\lambda$  分别表示有效探测面积、基本电荷量、普朗克常数、光速和激发光波长.通过计算得出该异质结器件的  $R$  和 EQE 随光功率的变化如图 6 所示.从图 6 可见器件响应度和外量子效率都随着光功率密度的增大而减小,这是光电探测器研究中出现的普遍现象,被认为是由光照射过程中的自热效应所引起<sup>[22]</sup>.在  $16 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光功率密度照射下,器件响应度和外量子效率最大,分别为  $7.13 \text{ A}/\text{W}$  和 3484%.表 1 列出了本文 PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  微米片异质结紫外探测器与最近报道的其他无机/有机自供电紫外探测器的性能比较.可以看出本文制备的紫外探测器与其他器件相比,在响应度和外量子效率方面具有较明显的优势.

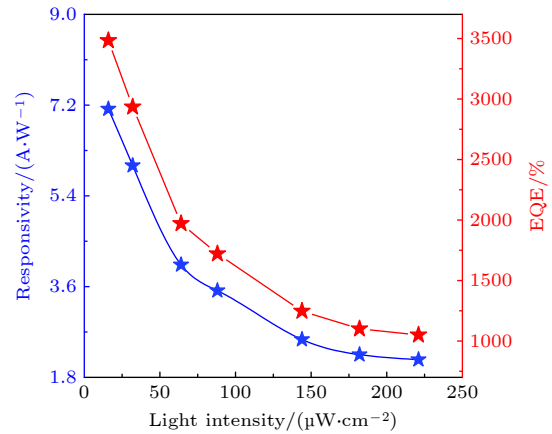


图 6 器件的响应度和 EQE 随光功率密度的变化  
Fig. 6. Responsivity and EQE of the device under various light intensities.

重复性和稳定性对于有机紫外光电探测器来说非常重要.在干燥室温条件下保存 3 个月对器件进行了 254 nm 紫外光电性能的测试(以 10 s 为时间间隔对器件进行 200 次周期性开和关),结果如图 7 所示.根据实验结果可知,器件在长达 3 个

表 1 自供电型无机/有机日盲紫外探测器的性能参数比较  
Table 1. Performance comparison of inorganic/organic self-powered solar blind UV detectors.

Structure	$R/(\text{mA}\cdot\text{W}^{-1})$	Light intensity/ $(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$	Rise/decay time	EQE/%	Ref.
PEDOT:PSS/ $\text{Ga}_2\text{O}_3$ microwire	$3.25\times 10^3$	16	0.25 s/0.20 s	1591	This work
Ppy-PEDOT:PSS/GaN	$1.1\times 10^3$	$6.56\times 10^3$	0.25 s/0.28 s	$4.0\times 10^5$	[23]
$\text{Ga}_2\text{O}_3$ /spiro-OMeTAD	65	1	2.98 $\mu\text{s}$ /28.49 $\mu\text{s}$	32	[24]
PEDOT:PSS/ $\text{Ga}_2\text{O}_3$ (Bulk)	37	$1.5\times 10^{-3}$	9 ms/9 ms	18	[25]
PEDOT:PSS/ $\text{Ga}_2\text{O}_3$ /Si	29	12	60 ms/88 ms	15	[26]
ZnO/PVK/PEDOT/CNT	9.96	210	1.5 s/6 s	$\sim 0.6$	[27]

月的时间里, 仍能保持与之前基本相同的光电流, 可以看出本文制备的异质结器件有着优异的重复性和稳定性.

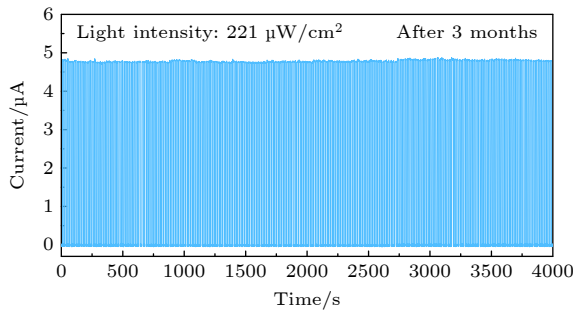


图 7 3 个月, 器件在 0 V 偏压下的时间响应  
Fig. 7. Time response of the device at 0 V bias after re-tested three months.

PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  异质结器件的工作原理如图 8 所示. 对于 p 型 PEDOT:PSS, 其带隙值约为 2 eV<sup>[28,29]</sup>, 由于  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  的费米能级高于 PEDOT:PSS, 因此在异质界面处  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  的能带向上弯曲, 而 PEDOT:PSS 的能带向下弯曲, 且内置电场指向 PEDOT:PSS 一侧. 当 254 nm 紫外光照射到器件表面时, 由于入射光的吸收将在 PN

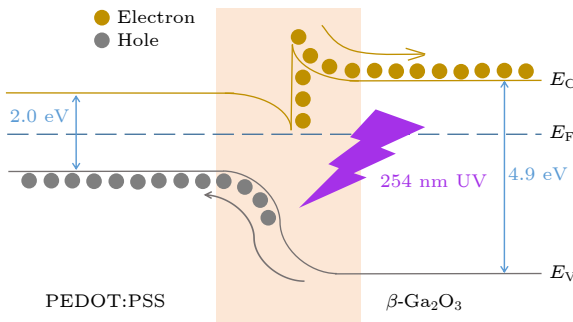


图 8 PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  异质结光电器件在 254 nm 和 0 V 偏压下的能带图  
Fig. 8. Schematic energy-band diagram of PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  heterojunction photodetector at 254 nm UV light illumination under zero bias.

结内部空间电荷区内, 产生大量电子-空穴对. 在较大的内建电场作用下, 这些光生电子-空穴对产生漂移运动将会迅速分离, 空穴会向 p 型 PEDOT:PSS 一侧输运, 而电子将向 n 区  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  一侧输运, 转移到器件的电极上, 导致光电流增加, 从而实现了器件在无外加电场作用下由光信号到电信号的转化.

## 4 结 论

采用机械剥离法从  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  单晶上剥离出长度为 4 mm, 宽度为 500  $\mu\text{m}$  的单根  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  微米片, 然后在微米片的一端涂覆一层 p 型导电聚合物 PEDOT:PSS, 制作出 PEDOT:PSS/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  无机-有机异质结的紫外光电探测器. 研究表明该 PN 结器件对 254 nm 紫外光非常敏感, 且实现了 0 V 下的自供电特性. 器件在零偏置电压, 254 nm 紫外光照射时的响应度为 7.13 A/W, 外部量子效率可达 3484%. 与此同时, 该光电探测器显示出较短的上升/下降时间 (0.25 s/0.20 s). 此外, 器件具有良好的重复性和稳定性, 在 3 个月后器件对 254 nm 紫外光的探测性能并未出现明显的衰减.

## 参考文献

- [1] Zhang C X, Xu C B, Wen G J, Lian Y F 2018 *Opt. Eng.* **57** 053109
- [2] Guo D K, Chen K, Wang S L, Wu F M, Liu A P, Li C R, Li P G, Tan C K, Tang W H 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 024051
- [3] Wu C, He C R, Guo D K, Zhang F B, Li P G, Wang S L, Liu A P, Wu F M, Tang W H 2020 *Mater. Today Phys.* **12** 100193
- [4] Tak B R, Singh R 2021 *ACS Appl. Electron. Mater.* **3** 2145
- [5] Fan M M, Liu K W, Zhang Z Z, Li B H, Chen X, Zhao D X, Shan C X, Shen D Z 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 011117
- [6] Yang W, Hullavarad S S, Nagaraj B, Takeuchi I, Sharma R P, Venkatesan T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3424
- [7] Cicek E, McClintock R, Cho C Y, Rahnama B, Razeghi M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 191108

- [8] Rathkantiwar S, Kalra A, Solanke S V, Mohta N, Muralidharan R, Raghavan S, Nath D N 2017 *Appl. Phys.* **121** 164502
- [9] Pearton S J, Yang J C, IV P H C, Ren F, Kim J, Tadjer M J, Mastro M A 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 011301
- [10] Jubu P R, Yam F K 2020 *Sens. Actuators A* **312** 112141
- [11] Liu W, Feng Q J, Yi Z Q, Yu C, Wang S, Wang Y M, Sui X, Liang H W 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 198503 (in Chinese) [刘玮, 冯秋菊, 宜子琪, 俞琛, 王硕, 王彦明, 隋雪, 梁红伟 2023 物理学报 **72** 198503]
- [12] Zhou Y M, Mei S J, Sun D W, Liu N, Shi W X, Feng J H, Mei F, Xu J X, Jiang Y, Cao X N 2019 *Micromachines* **10** 459
- [13] Feng Q, Du K, Li Y K, Shi P, Feng Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 077303
- [14] Liu Z Y, Khaled P, Li R J, Dong R H, Feng X L, Klaus M 2015 *Adv. Mater.* **27** 669
- [15] Son J, Kwon Y, Kim J, Kim J 2018 *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **7** Q148
- [16] Kwon Y, Lee G, Oh S, Kim J, Pearton S J, Ren F 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 131901
- [17] Feng Q J, Dong Z J, Liu W, Liang S, Yi Z Q, Yu C, Xie J Z, Song Z 2022 *Micro Nanostruct.* **167** 207255
- [18] Xu C X, Shen L Y, Liu H, Pan X H, Ye Z Z 2021 *J. Electron. Mater.* **50** 2043
- [19] Liu Z, Wang X, Liu Y Y, Guo D K, Li S, Yan Z Y, Tan C K, Li W J, Li P G, Tang W H 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 13920
- [20] Zhang M L, Ma W Y, Wang L, Liu Z, Yang L L, Li S, Tang W H, Guo Y F 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 160201 (in Chinese) [张茂林, 马万煜, 王磊, 刘增, 杨莉莉, 李山, 唐为华, 郭宇锋 2023 物理学报 **72** 160201]
- [21] Lin R C, Zheng W, Zhang D, Zhang Z J, Liao Q X, Yang L, Huang F 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 22419
- [22] Qi S, Liu J H, Yue J Y, Ji X Q, Shen J Y, Yang Y T, Wang J J, Li S, Wu Z P, Tang W H 2023 *J. Mater. Chem. C* **11** 8454
- [23] Pasupuleti K S, Reddeppa M, Park B G, Peta K R, Oh J E, Kim S G, Kim M D 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 54181
- [24] Yan Z Y, Li S, Liu Z, Zhi Y S, Dai J, Sun X Y, Sun S Y, Guo D Y, Wang X, Li P G, Wu Z P, Li L L, Tang W H 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 4502
- [25] Oshima T, Okuno T, Arai N, Suzuki N, Hino H, Fujita S 2009 *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** 011605
- [26] Zhang D, Zheng W, Lin R C, Li Y Q, Huang F 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1900935
- [27] Dong Y H, Zou Y S, Song J Z, Zhu Z F, Li J H, Zeng H B 2016 *Nano Energy* **30** 173
- [28] Ouyang J Y 2013 *Displays* **34** 423
- [29] Yu P P, Hu K, Chen H Y, Zheng L X, Fang X S 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1703166

# Performance of UV photodetector of mechanical exfoliation prepared PEDOT:PSS/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microsheet heterojunction\*

Yi Zi-Qi<sup>1)</sup> Wang Yan-Ming<sup>1)</sup> Wang Shuo<sup>1)</sup> Sui Xue<sup>1)</sup> Shi Jia-Hui<sup>1)</sup>  
 Yang Yi-Han<sup>1)</sup> Wang De-Yu<sup>2)</sup> Feng Qiu-Ju<sup>1)†</sup>  
 Sun Jing-Chang<sup>1)</sup> Liang Hong-Wei<sup>2)</sup>

1) (*School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China*)

2) (*School of Integrated Circuits, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

( Received 7 May 2024; revised manuscript received 3 June 2024 )

## Abstract

Ultrawide-bandgap (4.9 eV)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> material possesses exceptional properties such as a high critical-breakdown field ( $\sim 8$  MV/cm) and robust chemical and thermal stability. However, due to the challenges in the growth of p-type  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, the preparation of homojunction devices is difficult. Therefore, the utilization of heterojunctions based on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> provides a viable approach for fabricating ultraviolet photodetectors. Poly (3,4-ethylenedioxythiophene)-poly (styrenesulfonate) (PEDOT:PSS), a p-type organic polymer material, exhibits high transparency in a 250–700 nm wavelength range. Additionally, its remarkable conductivity ( $>1000$  S/cm), high hole mobility ( $1.7$  cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>), and excellent chemical stability make it an outstanding candidate for serving as a hole transport layer. Consequently, the combination of p-type PEDOT:PSS with n-type  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in a heterojunction configuration provides a promising way for developing PN junction optoelectronic devices.

In this study, a  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microsheet with dimensions: 4 mm in length, 500  $\mu$ m in width, and 57  $\mu$ m in thickness, is successfully exfoliated from a  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystal substrate by using a mechanical exfoliation technique. Subsequently, a PEDOT:PSS/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> organic/inorganic p-n heterojunction UV photodetector is fabricated by depositing the PEDOT:PSS organic material onto a side of the  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microsheet. The obtained device exhibits typical rectification characteristics, sensitivity to 254 nm ultraviolet light, and impressive self-powering performance. Furthermore, the heterojunction photodetector demonstrates exceptional photosensitive properties, achieving a responsivity of 7.13 A/W and an external quantum efficiency of 3484% under 254 nm UV light illumination (16  $\mu$ W/cm<sup>2</sup>) at 0 V. Additionally, the device exhibits a rapid photoresponse time of 0.25 s/0.20 s and maintains good stability and repeatability over time. Notably, after a three-month duration, the photodetection performance for 254 nm UV light detection remained unchanged, without any significant degradation. This in-depth research provides a novel perspective and theoretical foundation for developing innovative UV detectors and paving the way for future advancements in the field of optoelectronics.

**Keywords:**  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PEDOT:PSS, heterojunction, UV photodetector

**PACS:** 71.20.Nr, 81.05.Fb, 85.60.Gz, 85.30.-z

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240630

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12075045), the Dalian Technological Innovation Fund Project, China (Grant Nos. 2023JJ12GX016, 2023JJ12GX013, 2022JJ12GX023), the Liaoning Normal University 2022 Outstanding Research Achievements Cultivation Fund, China (Grant No. 22GDL002), and the Liaoning Normal University Education Teaching Reform Research Project, China (Grant No. LSJGJXFF202330).

† Corresponding author. E-mail: [qjfeng@dlut.edu.cn](mailto:qjfeng@dlut.edu.cn)

基于机械剥离制备的PEDOT:PSS/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>微米片异质结紫外光电探测器研究

宜子琪 王彦明 王硕 隋雪 石佳辉 杨壹涵 王德煜 冯秋菊 孙景昌 梁红伟

Performance of UV photodetector of mechanical exfoliation prepared PEDOT:PSS/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microsheet heterojunction

Yi Zi-Qi Wang Yan-Ming Wang Shuo Sui Xue Shi Jia-Hui Yang Yi-Han Wang De-Yu Feng Qiu-Ju Sun Jing-Chang Liang Hong-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 157102 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240630

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240630>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

多孔GaN/CuZnS异质结窄带近紫外光电探测器

Narrowband near-ultraviolet photodetector fabricated from porous GaN/CuZnS heterojunction

物理学报. 2022, 71(21): 218501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220990>

关于Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N同型异质结的双波段、双模式紫外探测性能分析

Dual-band and dual-mode ultraviolet photodetection characterizations of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N homo-type heterojunction

物理学报. 2023, 72(2): 027301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221738>

基于GaSe/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>异质结的自供电日盲紫外光电探测器

GaSe/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction based self-powered solar-blind ultraviolet photoelectric detector

物理学报. 2024, 73(11): 118502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240267>

WO<sub>3</sub>/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>异质结深紫外光电探测器的高温性能

Investigation of high-temperature performance of WO<sub>3</sub>/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction deep-ultraviolet photodetectors

物理学报. 2023, 72(16): 160201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230638>

Cu掺杂 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的制备及紫外探测性能

Preparation and ultraviolet detection performance of Cu doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films

物理学报. 2023, 72(19): 198503 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230971>

基于云母衬底生长的非晶Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>柔性透明日盲紫外光探测器研究

Flexible transparent solar blind ultraviolet photodetector based on amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grown on mica substrate

物理学报. 2021, 70(23): 238502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211039>